



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Jussi Kunnari

MUUNTAMON MONITOROINTILAIT- TEEN MITTAUSELEKTRONIIKKA

Tekniikka
2018

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Jussi Kunnari
Opinnäytetyön nimi	Muuntamon monitorointilaitteiston mittauselektroniikka
Vuosi	2018
Kieli	suomi
Sivumäärä	33
Ohjaaja	Jussi Kunnari

Työ toteutettiin Vaspec Oy:lle. Työn tavoitteena oli kehittää toimiva muuntamon monitorointilaitteiston mittauselektroniikan prototyyppi, joka pystyy mittaamaan 3-vaihe verkosta haluttuja arvoja ja ilmoittamaan vikatilanteista. Toimivalla prototyyppillä tulisi myös suorittaa testimittauksia ja kirjoittaa siihen ohjelmistoa.

Opinnäytetyössä tarkastellaan erilaisia mittausmenetelmiä sekä mittauksiin oleellisia komponentteja ja erityisesti työssä käytettäviä Rogowski-kehoja, AD-muuntimia, virranmittausta mikroprosessorilla sekä virtamuuntajia.

Toimiva laite pystyy kommunikoimaan muuntajien kanssa, tunnistamaan niistä vikatilanteet sekä raportoimaan niitä eteenpäin SCADA-valvomoon käyttämällä Ethernet-protokollaa.

Opinnäytetyössä päästiin suorittamaan simulaatioita LTSpice-ohjelmalla ja piirtämään PADS-ohjelmaa hyväksikäyttäen piirikaavioita, mutta työn käytännön osuus jäi kesken, kun loppuasiakas perui yllättäen tilauksen. Työ saatettiin loppuun teoriapainotteisena.

ABSTRACT

Author	Jussi Kunnari
Title	Muuntamon monitorointilaitteiston mittauselektroniikka
Year	2018
Language	Finnish
Pages	33
Name of Supervisor	Jukka Matila

This thesis was done for Vaspec Oy. The objective of the thesis was to develop a functioning prototype for measurement electronics in a power grid environment that can measure desired values from a 3-phase power grid and send an alert in case of failures such as ground fault.

This thesis will go through several procedures on measuring current and components that are essential to it. Specific components and methods are used in this thesis such as Rogowski-coil, analog to digital converter, current measurement with a microprocessor and current transformers.

An operational device can communicate with transformers, identify failures and report them to SCADA monitoring appliances using the Ethernet protocol.

In this thesis, simulations using were done using a program called LTSpice and wiring diagrams were drawn using PADS, but unfortunately as the end customer deemed the project unnecessary the practical part of the thesis was cut short. The thesis was finished leaning more on the theory side.

Keywords	Rogowski, SCADA, Analog to digital conversion and measurement
----------	---

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

1	JOHDANTO.....	6
2	TYÖN TARKOITUS	9
3	SÄHKÖVERKKO.....	10
	3.1 Sähköverkon valvonta ja suojaus.....	12
	3.2 Sähköverkon vikatilanteet.....	14
	3.2.1 Oikosulku.....	14
	3.2.2 Maasulku.....	15
4	VIRRRANMITTAUS	17
	4.1 Shunttivastus.....	17
	4.2 Rautasydänmuuntaja.....	18
	4.3 Rogowski-kela	20
	4.4 Zero-Flux-virtamittaus.....	24
	4.5 PT100.....	25
	4.6 Hall-ilmiö.....	27
	4.7 Mikrokontrollerit.....	28
5	YHTEENVETO	30
	LÄHTEET.....	31

KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuvio 1. Toimintaperiaate.	7
Kuvio 2. Prototyypin lohkokaavio.	8
Kuvio 3. Sähköverkon rakenne	10
Kuvio 4. Sähkönjakeluverkon kaaviokuva. /5/	12
Kuvio 5. SCADA-järjestelmä. /29/	14
Kuvio 6. Esimerkki kolmivaiheisesta oikosulusta /11/	15
Kuvio 7. Esimerkki kaksivaiheisesta oikosulusta /11/	15
Kuvio 8. Esimerkki maasulusta /11/	16
Kuvio 9. Jännitteen mittaus shunttivastuksen yli.	18
Kuvio 10.. Rautasydänmuuntaja. /26/	19
Kuvio 11. Symmetrinen kolmivaihemuuntaja.	20
Kuvio 12. Rogowski-kela kytkettynä operaatiovahvistimeen. /19/	21
Kuvio 13. Rogowski-kela /31/	22
Kuvio 14. Rogowski-kelan lineaarisuutta demonstroiva kuvaaja. /1/	23
Kuvio 15. Rogowski vs. rautasydänmuuntajasaturaatio. /20/	23
Kuvio 16. Zero-flux CT. /22/	25
Kuvio 17. Peruskytkentä Zero-Flux CT /21/	25
Kuvio 18. Kahden johtimen PT-100-kytkentä. /24/	27
Kuvio 19. A136x Hall-sensori korkeajännitteisen johtimen ympärillä. /23/	28
Kuvio 20. LTSpicellä rakennettu jänniteseuraajakytkentä.	29
Kuvio 21. Simulaatiokuva jänniteseuraajakytkennästä.	29
 Taulukko 1. Lämpötilan ja resistanssin suhde IEC 60751-standardin mukaan /8/	
.....	26

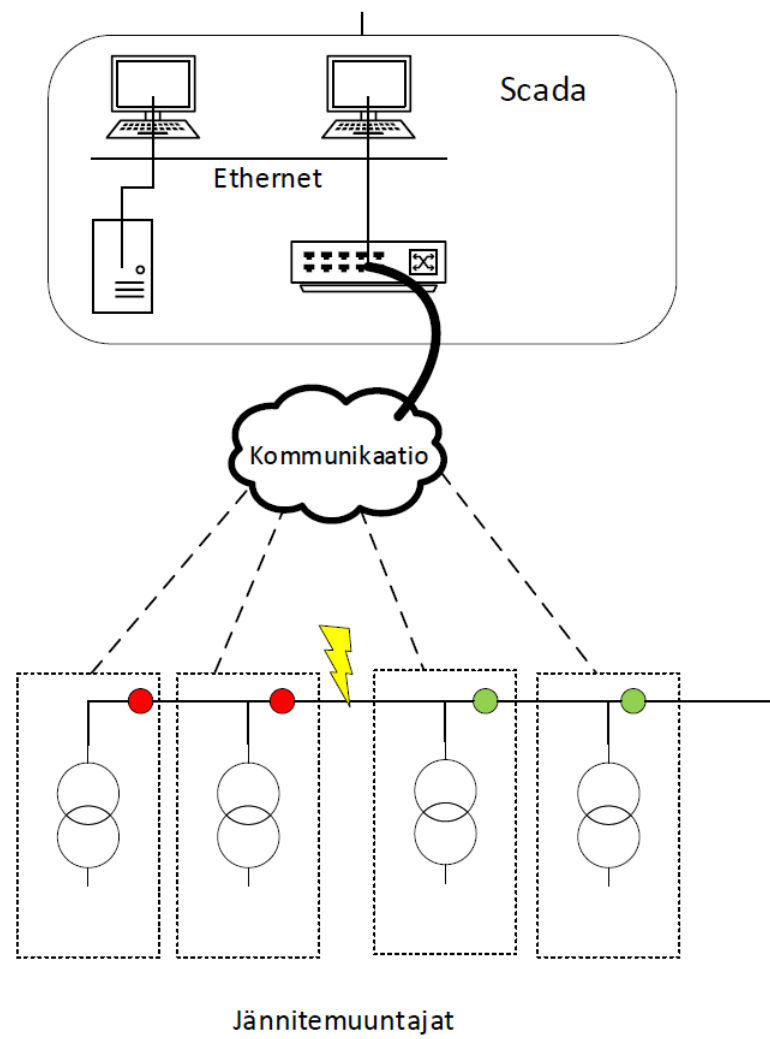
1 JOHDANTO

Sähköverkot sekä niiden rakenne muuttuvat jatkuvasti. Verkon monitorointi ja ylläpito on ottanut jättimäisiä loikkia eteenpäin nykypäivän tarjoaman teknologian edesauttamana. Vielä muutama vuosikymmen takaperin jouduttiin toimenpiteet, jotka voidaan nykyään hoitaa napin painalluksella etäältä tai jopa automatisoidusti, hoitamaan niin sanotusti käsin.

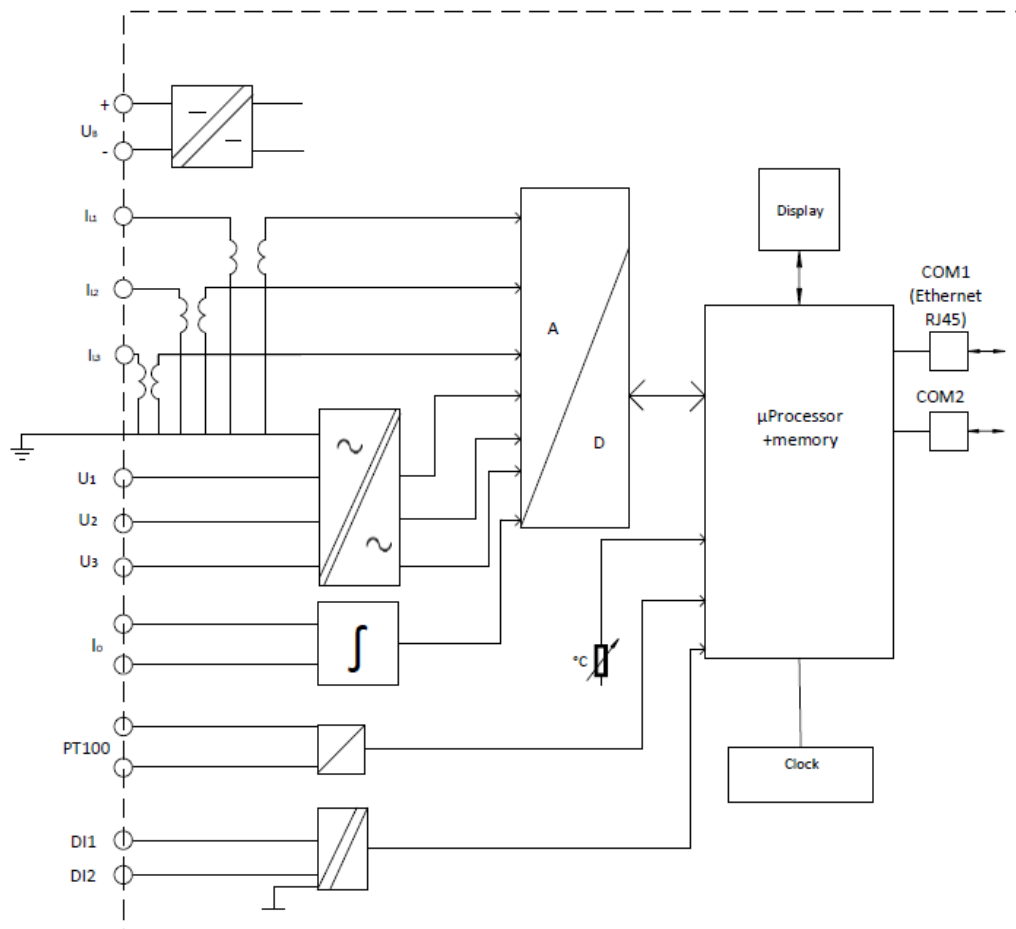
Tämä opinnäytetyö tarkastelee erilaisia mittausmenetelmiä erilaisissa ympäristöissä sekä sähköverkon ylläpitoon liittyviä teknisiä apuvälineitä, jotka ovat nykypäivänä hyvin ajankohtaisia.

Työn tavoitteena oli tehdä uskottava prototyyppi, jota asiakas voi esitellä. Prototyypille tuli suorittaa erilaisia mittauksia, kuten EMC-mittaukset.

Opinnäytetyön käytännön osissa päästiin simulointeihin ja piirikaavion valmistamiseen asti, mutta varsinaista prototyyppiä emme valitettavasti päässeet kalustamaan ja testaamaan, sillä loppuasiakas ilmoitti, että projekti on tällä hetkellä tarpeeton.



Kuvio 1. Toimintaperiaate.



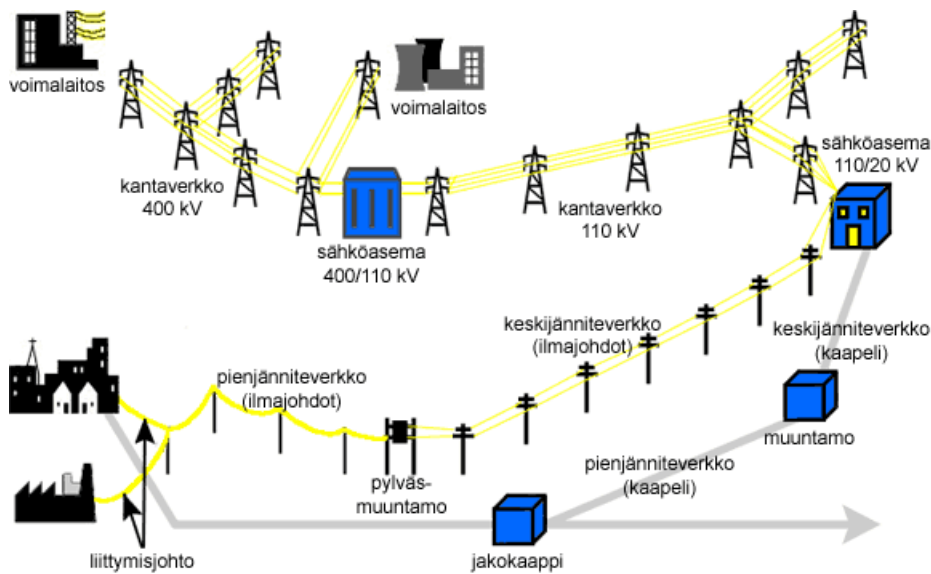
Kuvio 2. Prototyypin lohkokaavio.

2 TYÖN TARKOITUS

Työn tarkoituksena oli toimittaa Vaspecille uskottava prototyyppi projektista, joka on jäänyt roikkumaan. Prototyypin pohjalta asiakas voi esitellä tuotetta ja kehittää sitä eteenpäin. Tavoitteena on myös piirtää liitântä- sekä lohkokaaavio. Prototyypillä voidaan monitoroida sähköverkon tilaa, laitteistoa sekä verkossa olevan virran ja jännitteen hetkellisarvoja. Prototyypille suoritetaan EMC – mittaukset VAMKin tiloissa sekä häiriömittaukset ennen integraattoria ja sen jälkeen.

3 SÄHKÖVERKKO

Suomessa sähköverkon toiminta selittyy hyvin kuviosta 1. Voimalaitoksessa tuotettu sähkö lähtee kantaverkkoa pitkin sähköasemalle 400 kV suuruisena, jossa se muunnetaan 110 kV ja siitä eteenpäin toiselle sähköasemalle, jossa jännite muuntuu 20 kV suuruiseksi. Tästä eteenpäin verkko jatkaa ilmajohtoja pitkin aina pylväsmuuntamolle saakka, jossa jännite muunnetaan kotitalouksille sopivaksi pylväsmuuntajassa 230 V ja 50 Hz suuruiseksi. Suomen kantaverkossa voimajohtojen yhteispituus on 15 000 km. /4/,/5/



Kuvio 3.Sähköverkon rakenne

Jakeluverkko voidaan jakaa viiteen osaan: kantaverkko, sähköasemat, keskijänniteverkko, muuntamot ja liittymisjohtot. /30/

Kantaverkko on se osa, joka yhdistää Suomen eri voimalaitokset sekä alueet toisiinsa. Suomessa kantaverkko on yhdistetty myös kaikkiin Suomen naapurimaihin. Riippumatta voimalaitoksen toimintatavasta, käyttävät ne kaikki kantaverkkoa sähkönjakeluun. Kantaverkossa on kolme eri jännitetasoa, 400 kV, 220 kV ja 110 kV. Suomen kantaverkko on myös kytketty naapurimaihin Venäjälle, Norjaan sekä Ruotsiin. Näin mahdollistetaan sähkön tuonti sekä vienti

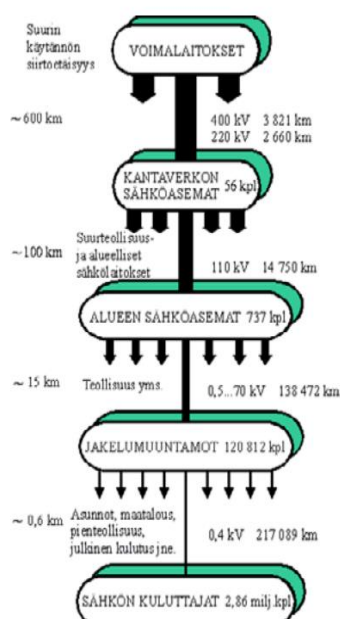
myös naapurimaihin. Koko kattavan kantaverkon omistaja on Suomen Kantaverkko Oy. /4/,/5/

Sähköasemia voidaan kutsua sähköverkkojen solmupaikoiksi. Näissä asemissa sähkö muunnetaan eri suuruiseksi, syötetään ja kytketään eri sähköverkkoihin. Jos sähköasemaa käytetään muuntamiseen, kutsutaan sitä yleensä muuntoasemaksi. Suomessa kantaverkkoa ohjaa 116 sähköasemaa. /5/,/30/

Keskijänniteverkkoa käytetään hyväksi, kun sähköä siirretään sähköasemalta lähemmäs sähkön loppukäyttäjää. Yleensä keskijänniteverkon suuruus on 20 kV, joissain tapauksissa se voi olla 10 kV. /5/,/30/

Muuntamot muuttavat jännitteestä edelleen pienemmäksi 20 kV:sta. Tässä vaiheessa jännite on joko 230 V tai 400 V, sen suuruisena verkko jatkaa matkaansa pienjänniteverkkoa pitkin aina liittymisjohtoon ja rakennuksen sulaketauluun saakka. /5/,/30/

Liittymisjohdot ovat viimeinen siirtymäreitti kohti lopullista kuluttajaa. Liittymisjohdolla yhdistetään verkko pienjänniteverkosta rakennuksen sulaketauluun. /5/,/30/



Kuvio 4. Sähkönjakeluverkon kaaviokuva. /5/

3.1 Sähköverkon valvonta ja suojaus

Sähköverkon valvonta sekä suojaus tapahtuu nykyään hyvin pitkälti automatisoidusti sen toiminnan helpottamiseksi sekä kustannusten alentamiseksi. Automatisoinnin mahdollistavat IED:t (Intelligent electronic device) eli älylliset sähkölaitteet. Jotta laite voidaan laskea IED:ksi, täytyy siinä olla vähintään yksi prosessori ja kyky vastaanottaa sekä lähettää dataa ja käskyjä ulkoiselle laitteelle. Nämä laitteet ovat usein releitä, mittareita sekä erilaisia sensoreita. IED:t sisältävät yhden tai useamman mikroprosessorin sekä erinäisiä portteja kommunikaatiota varten, kuten RS232 ja TCP/IP. Hyvin usein releissä on graafinen käyttöliittymä, josta pystytään lukemaan erinäisiä arvoja myös paikan päällä. Laitteet pystyvät myös suorittamaan komentokäskyjä, joilla ohjataan sähköverkon toimintaa. /18/

Sähköasemien automaatiota ohjaava standardi on nykyään IEC 61850. IEC 61850 on kansainvälinen standardi, jolla määritetään kommunikaatioprotokollat sähköasemalla olevien laitteiden välille. Tämä helpottaa suuresti esimerkiksi sitä, että eri laitevalmistajien suunnittelemat laitteet pystyvät kommunikoimaan keskenään. /18/

Releet ovat osa suurta kommunikointiverkkoa, joka tapahtuu Ethernet-verkon välityksellä. Viestintä näissä laitteissa on joko pysty- tai vaakasuuntaista, jolla tarkoitetaan sitä, että pysyykö viestintä samalla tasolla, vai kommunikoidaanko korkeammalle tasolle. /28/

Pystysuuntaisella viestinnällä tarkoitetaan sitä, että releet kommunikoivat korkeamman tason hallintajärjestelmän kanssa. Tällä järjestelmällä voidaan esimerkiksi tarkoittaa SCADA-järjestelmää (Supervisory control and data acquisition). /28/

Vaakasuuntainen viestintä taas tarkoittaa sitä, että laitteet vaihtavat informaatiota keskenään. IED-laitteiden ja valvomon välillä liikkuu operationaalista dataa kuten jännite- ja virta-arvot ja kytkimien sekä erottimien asennot annetulla hetkellä.

Tämä on elintärkeää tärkeää informaatiota henkilöstölle, joka monitoroi sekä ohjaa sähköverkkoa ja sen toimintaa. /28/

Jotta laitteet ymmärtävät ihmistä, tarvitaan väliin HMI (Human Machine Interface). Tällaisiksi rajapinnoiksi voidaan luokitella esimerkiksi erinäiset painikkeet, kytkimet ja jopa tietokone. Kun laitteisiin ilmenee vikatilanne ja vaikka kytkin napsahtaa ala-asentoon, on vika mahdollista korjata valvomosta käsin käyttämällä näitä erilaisia rajapintoja, joilla voidaan vaikkapa pakottaa kytkin muuttamaan tilaansa. /29/

SCADA-ohjausjärjestelmiä käytetään valvomoissa, joissa sähköverkkoa ohjataan ja valvotaan täysin. Järjestelmä kerää tietoja sähköasemien ala-asemilta ympäri vuorokauden. Tähän dataan perustuen, voidaan muodostaa täydellinen kuva esimerkiksi asuinalueen tai minkä tahansa sähköverkon tilasta. Tämä helpottaa suuressi vianetsintää sekä verkon ohjausta. Ohjelmaan rakennettua rajapintaa voidaan käyttää hyväksi vikatilanteissa, esimerkiksi eristämällä täysin viallinen alue muusta verkosta ja ohjata sähkönsyöttö muita reittejä pitkin. Valvontajärjestelmiin on integroitu tietokanta, johon pystytään tallentamaan suuria määriä dataa, joka on hyödyksi muun muassa vianetsintäoperaatiossa sekä raportoinnissa. /32/



Kuvio 5. SCADA-järjestelmä. /29/

3.2 Sähköverkon vikatilanteet

Ideaalimaailmassa sähköverkkoon ei tule koskaan vikatilannetta, mutta valitettavasti käytännössä asia ei ole näin. Verkkoihin viat tulevat tekijöistä, joille ei usein voida mitään. Esimerkkeinä voidaan käyttää puun kaatumista linjan päälle, salamisku ja laitteiden toimintahäiriöitä. Erilaisia vikatilanteita ovat oikosulut ja maasulut. Kun vikatilanne ilmenee, seurauksena voi olla sähköverkon täydellinen tai osittainen katkeaminen, tulipalo ja suuret kustannukset.

3.2.1 Oikosulku

Oikosulku tarkoittaa yksinkertaistettuna sitä, että kahden tai useamman johtimen välille syntyy äärimmäisen matala resistanssinen kytkentä virtapiiriin. /11/

Kolmivaiheisessa oikosulussa kolme johdinta koskettavat toisiaan fyysisesti ja vaiheissa ei ole impedanssia. Tällaista vikatilannetta kutsutaan symmetriseksi, sil-

lä virta kolmessa johtimessa jakaantuu tasaisesti kolmen vaiheen välille. Kolmivaiheinen oikosulku on pahin mahdollinen tilanne virtapiirissä, sillä sen tapahtuessa vikavirran suuruus on 10-40 kertainen normaalin kuormitusvirtaan verrattuna. /11/,/15/



Kuvio 6. Esimerkki kolmivaiheisesta oikosulusta /11/

Kaksivaiheisessa oikosulussa kaksi erivaiheista johdinta koskettavat toisiaan ja luovat oikosulun. Vikavirta kyseisessä vikatilanteessa on suuruudeltaan noin 20 % pienempi kuin kolmivaiheisessa oikosulussa. Kaksivaiheisessa oikosulussa vikavirrat eivät kuitenkaan ole symmetrisiä, vaan toisessa vaiheessa voi kulkea enemmän virtaa ja jännitettä kuin toisessa. /11/

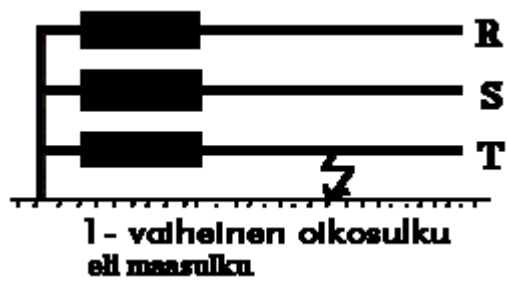


Kuvio 7. Esimerkki kaksivaiheisesta oikosulusta /11/

3.2.2 Maasulku

Yksivaiheista oikosulkua kutsutaan maasulkuksi. Tällainen vikatilanne ilmenee, kun yksi vaiheista on kosketuksessa maahan. Tämä on vikatilanteista ylivoimais-

sesti tavallisin. Maasulku on myös epäsymmetrinen kaksivaiheisessa oikosulkutilanteissakin. Maasulussa ilmenevät vikavirrat ovat suuria, aivan kuten oikosulku tilanteissakin. /11/,/15/



Kuvio 8. Esimerkki maasulusta /11/

4 VIRRANMITTAUS

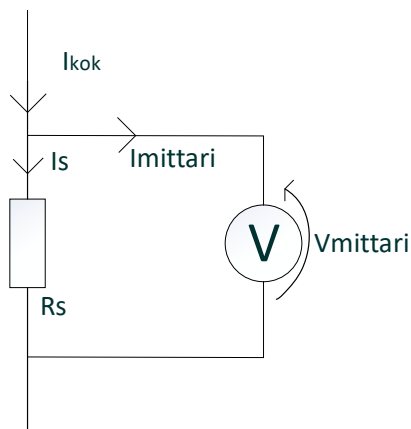
4.1 Shunttivastus

Shunttivastusta käytetään hyväksi virranmittauksessa ja siinä käytetään jo perussähköopissa tutuksi tullutta Ohmin lakia. Vastusta käytetään siinä vaiheessa, kun ampeerimäärä on liian suuri pelkälle mittausspiirille ja suurin osa virrasta ohjataan silloin shunttivastuksen yli. Kaava, jolla virran arvo saadaan laskettua on:

$$I = \frac{U}{R} \quad (1)$$

Shunttivastus on resistanssiarvoltaan hyvin pieni ja se kytketään rinnan jännitettä mittaavan kojeen kanssa. Näin saadaan luotua suurille virroille polku, jota pitkin kulkea ilman, että se vahingoittaisi muuta mahdollisesti hyvinkin kallista kalustoa piirissä. /12/,/13/

Kuviossa 9 on esitetty demokytKentä. Virta saadaan laskettua, kun käytetään yllä mainittua virran kaavaa, eli jaetaan jännitemittarin näyttämä arvo, joka on vastuksen yli vaikuttava jännitehäviö ja jaetaan se shunttivastuksen resistanssiarvolla. Kytkennässä vain murto-osa virrasta kulkee jännitemittarin ylitse ja jäljellä oleva virta ajetaan shunttivastuksen kautta.



Kuvio 9. Jännitteen mittaus shunttivastuksen yli.

Vastusta valittaessa on erittäin tärkeää ottaa huomioon vastuksen toleranssi, lämpötilankesto sekä tehonkesto, sillä korkeassa lämpötilassa vastuksen arvot muuttuvat. Kun tehonkesto ylitetään, voi vastus vahingoittua ja olla täysin käyttökelpoton. /12/

4.2 Rautasydänmuuntaja

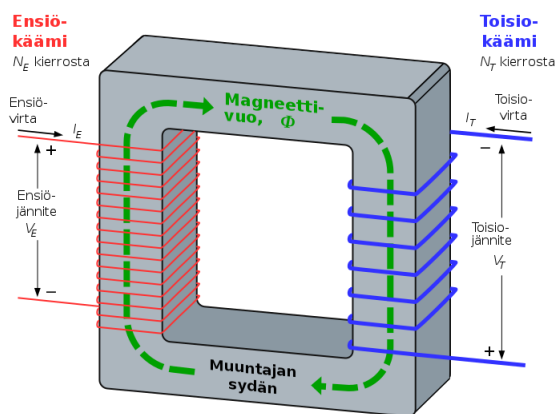
Rautasydänmuuntajaksi kutsutaan laitetta, joka muuntaa laitteeseen ensiöpuolelta tulevan virran tai jännitteen suuruutta. Yleensä suuri virta tai jännite muutetaan yhteensopivaksi muuntajan toisiopuolella oleville laitteille. Suurimmassa osassa virtamuuntajista suhde on luokkaa 100/5. Tämä tarkoittaa sitä, että toisiopuolella virta on 20 kertaa pienempi kuin ensiöpuolella. /6/

Perinteisessä muuntajassa on rautasydän, jonka molemmilla puolilla on käämitty N määrä kierroksia, näitä kutsutaan ensiö- ja toisiokäämeiksi. Toisin kuin jännitemuuntajissa, virtamuuntajilla on ensiöpuolella huomattavasti pienempi määrä kierroksia käämittynä, tätä kutsutaan step-up muuntajaksi. Vastaavasti step-up muuntajassa ensiöpuolella on suuri määrä kierroksia käämittynä toisiopuoleen verrattuna. Virtamuuntajaa käytetään joko mittaukseen tai suojaukseen. Myös samalla muuntajalla on mahdollista tehdä molempia, mutta silloin muuntajalla on useampia sydämiä. Sydäntä, jota käytetään mittaukseen, kutsutaan mittaussydämeiksi ja taas suojaukseen käytettävää suojasydämeiksi. Kun sydämiä on useampia, ensiökäämi on yhteinen, mutta joka sydämellä on oma toisiokääminsä. Eristykseen ulosasennettavissa muuntajissa käytetään öljyä ja ne ovat hermeettisesti suojattuja, mikä tarkoittaa, että ne on suojattu ulkopuolisilta kaasuilta ja nesteiltä säilyäkseen paremmin. Sisätiloihin asennettavissa muuntajissa käytetään valuhartsieristystä, jonka eduksi voidaan laskea suuri sähköinen sekä mekaaninen lujuus. Ulkopuolinen eristys on tavallisimmin posliinikuori. /6/,/26/

Muuntajiin pätee seuraava kaava, mitä korkeampi lukumäärä käämittyjä kierroksia toisiopuolella on, sitä pienempi virta toisiopuolella.

$$I_T = I_E \left(\frac{N_E}{N_T} \right) \quad (2)$$

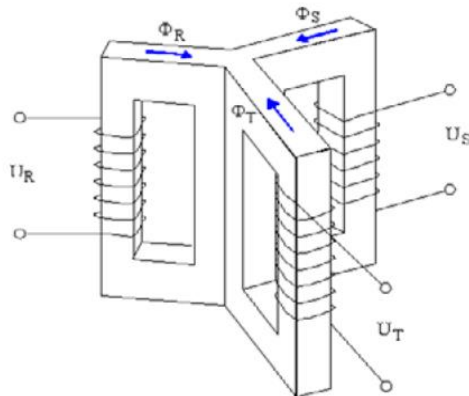
Toimintaperiaate laitteilla on melko yksinkertainen, primääripuolelle tuleva vaihtovirta johdetaan rautasydämen läpi ja tämä saa aikaan magneettivuon. Siitä seuraa, että toisiopuolelle indusoituu oikean suuruinen virta niille laitteille, mitä ikinä sen takana onkaan. Monet hyvin tavalliset laitteet käyttävät tätä tekniikkaa hyödykseen, muutamana esimerkkinä voitaisiin mainita erilaiset laturit sekä laitteiden virtalähteet. /6/,/26/



Kuvio 10.. Rautasydänmuuntaja. /26/

Sähkönjakelussa käytetään pääsääntöisesti kolmivaihemuuntajia. Ne rakennetaan siten, että kytketään kolme yksivaihemuuntajaa yhteen, tällöin muuntajat ovat yhteydessä toisiinsa sähköisesti, mutta magneettisesti ne ovat erillään. Kolmivaihemuuntajassa jokaisen vaiheen välillä on 120 astetta vaihesiirtoa ja ne niillä on

yksi yhteinen pylväs, silloin saadaan vuo-osoittimien summaksi 0.



Kuvio 11. Symmetrinen kolmivaihemuuntaja.

4.3 Rogowski-kela

Rogowski-kela on nimetty saksalaisen fyysikon Walter Rogowskin mukaan. Kelaä käytetään korkeataajuisien vaihtovirtojen mittaamiseen.

Kelassa itsessään ei ole magneettista rautasydäntä laisinkaan, vaan siinä kelan toisiokäämi on kierretty renkaaksi vaikkapa ilmasydämen ympärille. Paluujohdin on mahdollista kuljettaa kierrosten läpi kelan toiseen päähän, mikä mahdollistaa sen, että molemmat käämin päät ovat samalla puolella. Tämä tehdään siitä syystä, että tämä estää magneettikenttien häirinnän käämin ulkopuolelta, mikä on Rogowski-kelan suuria etuja. Näiden päiden välille indusoituu jännite, joka on suoraan verrannollinen mitattavan johtimen läpi kulkevan virran aikaderivaattaan. Jos käämitykset ovat identtisiä, ulostulojännite jonka virta indusoi kaksinkertaistuu. /2/

Kun kelassa syntynyt jännite integroidaan, saadaan lähdön alkuperäiseen mitattuun virtaan verrannollinen jännite. Tästä syystä kelat tulisi kytkeä integraattoriin, jotta saaduista tuloksista olisi jotain hyötyä. Kaava Rogowski-kelan tuottamalle jännitteelle on seuraava:

(3)

$$v(t) = \frac{-AN\mu_0}{l} \frac{dI(t)}{dt} \quad (3)$$

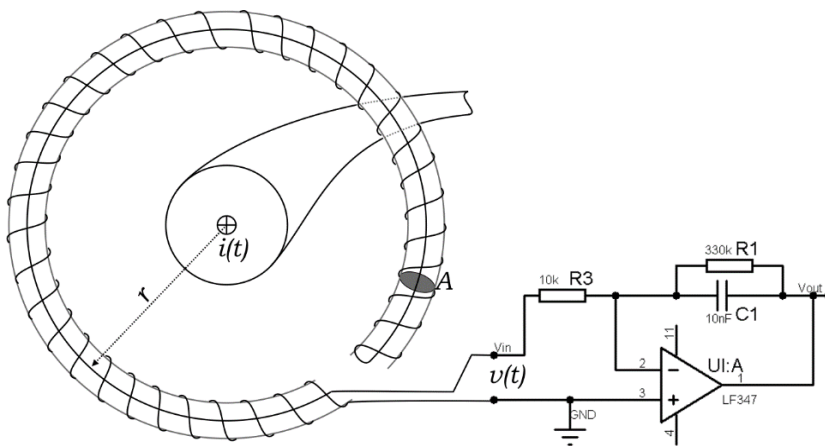
A = yhden kierroksen pinta-ala

N = kierrosten lukumäärä

l = käämin pituus

$\frac{dI(t)}{dt}$ = johtimen läpi kulkevan virranvaihtuvuusnopeus

μ_0 = tyhjiön permeabiliteetti ($4\pi * 10^{-7}$)



Kuvio 12. Rogowski-kela kytkettynä operaatiovahvistimeen. /19/

Rogowski-kelalla on monia etuja verrattuna ”perinteiseen” virtamuuntajaan, mm. alhaiset tuotantokustannukset ja alhainen induktanssi. Tämä mahdollistaa taas sen, että kela reagoi virran muutoksiin nanosekunneissa, laaja taajuusalue ja kaistanleveys, joka tekee siitä erittäin hyvän muun muassa tehon laadun mittaukseen. Rogowski-kela sietää suuria ylikuormitusvirtoja vahingoittumatta. Kela on myös erittäin turvallinen, sillä siinä ei ole riskiä toisiokäämin avautumiselle. Kyseinen komponentti ei myöskään syö tehoa päävirtapiiristä ja siihen ei vaikuta ulkoiset

magneettikentät. Suurena hyötynä tulee mainita myös kelojen kompakti koko sekä paino. /3/,2/

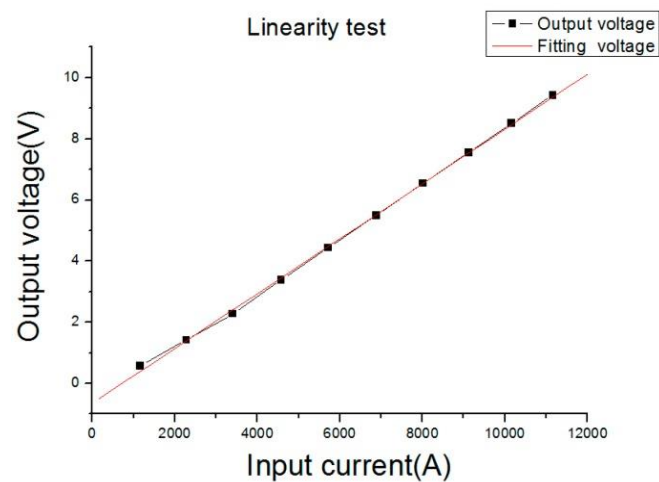
Rogowski-keloja on monenlaisia, yksi- tai monikerros, ja jäykkiä sekä joustavia. Ydin voidaan valmistaa muovista, epoksista tai jostain muusta eristävästä materiaalista. /2/

Joustavat Rogowski-kelat voidaan kääriä silikonimuoviin ja yleensä käämitys on yksikerroksisesti toteutettu. Paluujohdin kuljetetaan kierrosten läpi samaan päähän kuin alkupää ja tämä eliminoi ulkopuolisen magneettisen häirinnän. Tätä eliminointia pystytään tehostamaan käämin yhtenäisyydellä, käämimistekniikalla ja ”counter-loop”- mallilla. Nämä joustavat kelat ovat myös ideaaleja siihen, että ne saadaan mahtumaan paikkoihin, mihin esimerkiksi jäykkiä keloja on miltei mahdotonta saada. Tarkkuus näillä joustavilla keloilla on noin 1 %-3 %. Tässä insinöörityössä käytetään joustavaa mallia.



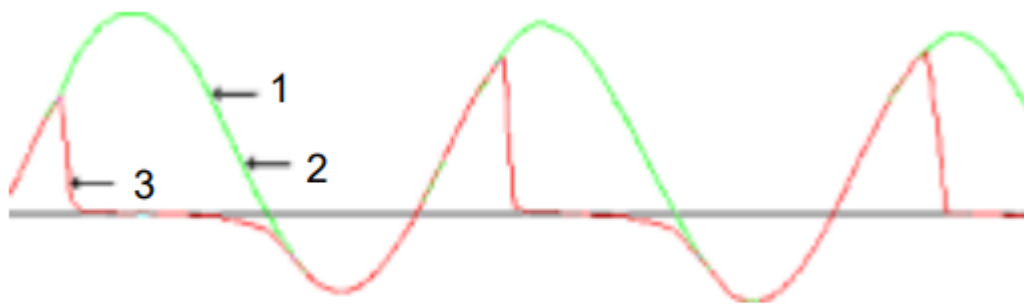
Kuvio 13. Rogowski-kela /31/

Johtuen siitä, että kelat on käämitty ei-magneettiseen materiaaliin, esimerkkinä ilmasydän, kelat ovat lineaarisia. Luonnollisesti ilmasydän ei voi saturoida. Kuvio 14 demonstroi lineaarisuutta virta-alueella 1kA – 12 kA. /19



Kuvio 14. Rogowski-kelan lineaarisuutta demonstroiva kuvaaja. /1/

Verrataan perinteisen virtamuuntajan ja Rogowski-kelan toisiovirtoja ja niiden aaltomuotoja. Tavallisessa virtamuuntajassa saturaatiota voi olla melko paljon, mutta Rogowski-kelassa ei ollenkaan. Tästä johtuen, virtamuuntajan toisiosignaali on säröinen, kun taas toimivassa Rogowski-kelassa signaali vastaa virtaa melkein täysin. Kuvio 15 kuvastaa tätä ilmiötä.



1. Non-symmetric primary current
2. Primary current measured by Rogowski coil
(output voltage of coil is integrated numerically)
3. Secondary current of a conventional CT

Kuvio 15. Rogowski vs. rautasydänmuuntajasaturaatio. /20/

Kun rautasydämisessä virtamuuntajassa toisiokäämi avautuu, ovat siellä jännitteet mahdollisesti 10 kV suuruusluokkaa, jotka ovat hengenvaarallisia ihmisille, mutta voivat suurella todennäköisyydellä rikkoa myös laitteet, kun taas Rogowski-kelassa, jos oikosulku tapahtuisi, ei mitään vaaraa ihmisille tai laitteistoille olisi. Jännite olisi 10 V tai pienempi. Induktanssi kelassa on hyvin pieni, joten suuria virtoja ei edes pääse syntymään.

Rogowskin kytkeminen releeseen on mahdollista toteuttaa ilman riviliittimiä, koska jännitteet ovat avoimessakin virtapiirissä niin pieniä ja vaikka siihen menisi osaksi piiriä, niin mitään riskiä ei ole.

4.4 Zero-Flux-virtamittaus

Zero-Flux, eli nollavuovirtamittauksessa päävirta I_p luo magneettivuon, jota taas toisiokäämeissä liikkuva virta I_s vastustaa. Kahta näistä käämeistä N1 ja N2 käytetään tasavirran mittaamiseen, kun taas N3:sta käytetään vaihtovirran mittaamiseen. Tasavirtaa aistivat käämit asetetaan saturaation täysin vastakkaisiin suuntiin oskillaattoria hyväksikäyttäen. Tästä seuraa se, että huippujännitteet ovat samat molempiin suuntiin, jos jäljelle jäävä tasavirta on 0. Jos kuitenkin tilanne on se, että vuossa oleva virta ei ole 0, vaihtovirtaosa N3 generoi virran, jolla tämä saadaan nollassa. /21/

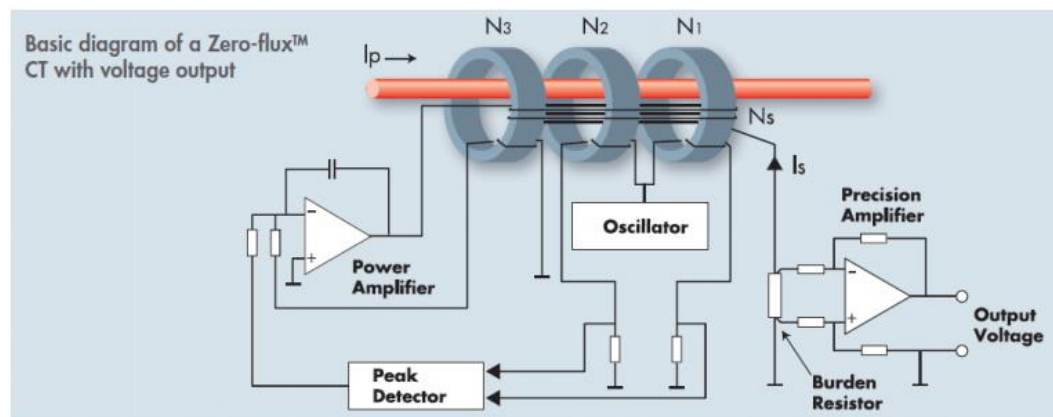
Toisiovirta johdetaan kuormavastukselle, jotta saadaan tästä signaalista jännitettä. Kun liikutaan useissa kilohertseissä, vahvistin ei enää pysty aktiivisesti hallitsemaan ulostulojännitettään, vaan luo oikosulun. /21/

Zero-flux-järjestelmät omat omaa luokkaansa tarkkuudeltaan sekä pystyvät mittaamaan virtaa jopa 60 kA asti. Muiksi hyödyiksi voidaan laskea kaksisuuntaisen

toiminnallisuuden. Laite resetoit itsensä ylikuormituksen jälkeen automaattisesti, värinä ja häiriöt ovat erittäin alhaista tasoa. /21/



Kuvio 16. Zero-flux CT. /22/



Kuvio 17. Peruskytkentä Zero-Flux CT /21/

4.5 PT100

PT100-lämpötila-anturi toimii vastuslämpötilaperiaatteella, eli eri lämpötiloissa vastuksen resistanssin arvo muuttuu. Toimintaperiaate on hyvin yksinkertainen,

lämpötilan noustessa vastusarvo kasvaa ja vastaavasti lämpötilan laskiessa, vastusarvo pienenee. Nimellisvastus anturilla on 100 Ohmia 0°C asteessa. Teollisuusympäristöissä nämä anturit ovat ylivoimaisesti käytetyimpiä laitteita, sillä vanhemman tekniikan termoparit korvataan PT100-laitteilla. /8/

Lyhennys PT tulee sanasta platina, ja luku 100 viittaa nimellisvastukseen, joka on 100 ohmia nollalämpötilassa. Tällä hetkellä standardi, jota seurataan platinavastuslämpötila-antureissa, on IEC 60751. /7/,/8/

Taulukko 1. Lämpötilan ja resistanssin suhde IEC 60751-standardin mukaan /8/

Lämpötila (°C)	Resistanssi(Ω)
-200	18,52
-150	39,72
-50	80,31
0	100
50	119,4
100	138,5

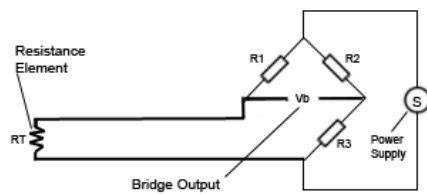
IEC 60751-standardissa määritellään neljä eri tarkkuusluokkaa: C, B, A ja AA.

Luokka C = $\pm(0,60 + 0,01 * t)$ (-50 to 500°C)

Luokka B = $\pm(0,30 + 0,05 * t)$ (-50 to 500°C)

Luokka A = $\pm(0,15 + 0,02 * t)$ (-30 to 300°C)

Luokka AA = $\pm(0,10 + 0,0017 * t)$ (0 to 150°C) /25/

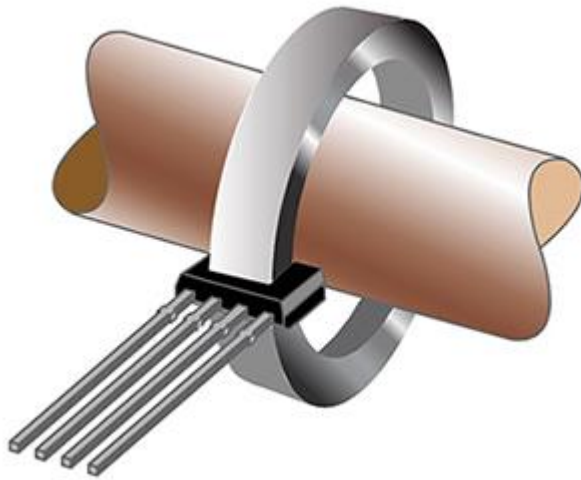


Kuvio 18. Kahden johtimen PT-100-kytkentä. /24/

4.6 Hall-ilmio

Hall-ilmio on nimetty Edwin Hallin mukaan, joka havaitsi sen toimintaperiaatteen vuonna 1879. Hall huomasi, että jos metallilanka, jossa kulkee virtaa tuodaan magneettikenttään, synnyttää se pienen jännitteen. Jännite syntyy siitä, kun magneettikenttä ohjaa elektronit johtimen toiseen reunaan ja siitä syntyy johtimen reunoille mitattava Hall-jännite. Hall-jännitteen suuruuteen vaikuttaa johdinmateriaali, sillä johdinmateriaali vaikuttaa elektronien nopeuteen johtimen sisällä. /9/,/10/

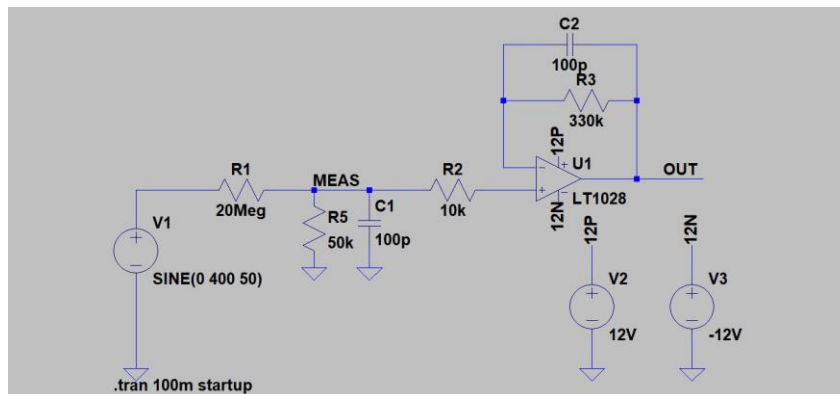
Hall-anturilla virranmittaus tapahtuu mittaamalla johtimessa kulkevan virran muodostamaa magneettikentän voimakkuutta johtimen ympärillä. Etäisyys johtimen keskipisteestä vaikuttaa suuresti mittaustulosten herkkyyteen, joten ideaalitalanteessa on anturi pidettävä mahdollisimman lähellä johdinta, mutta galvaanisesti eristettuna. /17/



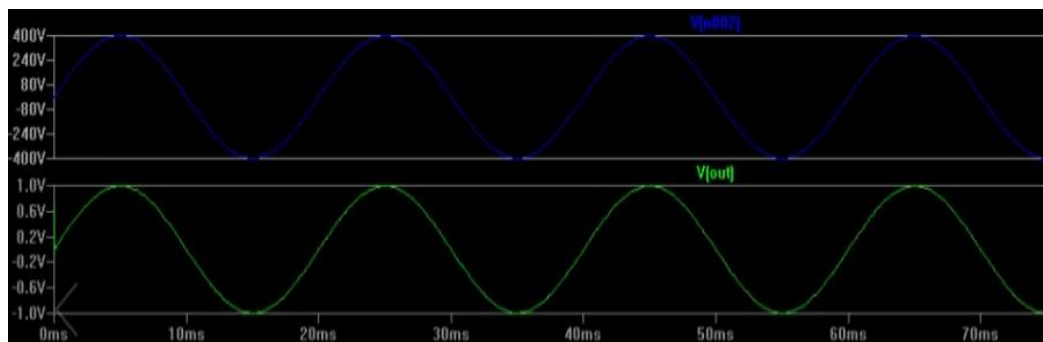
Kuvio 19. A136x Hall-sensori korkeajännitteisen johtimen ympärillä. /23/

4.7 Mikrokontrollerit

Mikrokontrollereissa ei tavallisesti ole pinnejä pelkkään virranmittaukseen, mutta niissä on A/D-muunnin pinnejä, josta mitatun jännitteen avulla voidaan laskea virta. Mikrokontrollerin A/D-pinneihin tuotu jännite on yleensä väliä 0-5 voltia. Jos jännite on korkeampi kuin 5 voltia, joudutaan sitä pienentämään sarjavastuksella, joka kytketään jännitesyöttöön. A/D-muunnoksessa ulostulevan signaalin voimakkuus on tärkeää ja joskus sitä joudutaan vahvistamaan. Tämän mahdollistaa vahvistimen vahvistus arvon muuttaminen, joka taas tapahtuu kytkennässä olevien komponenttien arvoja muuntamalla. Kuviossa 20 työssä tehdyistä jännitebuffer-simulaatioista, joissa jännite lasketaan luettavaan arvoon. Kuvioissa 20 ja 21 syöttöjännite on 400 voltia ja ulostulossa 1 voltti. /16/,/27/



Kuvio 20. LTSpicellä rakennettu jänniteseuraajakytkentä.



Kuvio 21. Simulaatiokuva jänniteseuraajakytkennästä.

AD-muunnoksella tarkoitetaan sitä, että analoginen signaali muutetaan digitaalsiksi numeroarvoiksi. Esimerkkinä voidaan käyttää sitä, kun mikrokontrolleri saa jännitteen 5 V, ymmärretään se arvona 1. Kun taas jännite on 0 V, on sen arvo 0. Valitettavasti signaalit, joita tulkitaan, eivät ole niin mustavalkoisia, vaan usein joudutaan analysoimaan signaaleja, jotka muuttuvat. Näitä signaaleja kutsutaan analogisiksi signaaleiksi. /27/

Kun piiristä halutaan mitata virtaa mikrokontrolleria hyväksikäyttäen, tulee virtapiiriin kytkeä aiemmin puhuttu shunttivastus. Virta saadaan laskettua vastuksen yli vaikuttavasta jännitteestä Ohmin lakia käyttäen, sillä shunttivastuksen ja jännitteen suuruus on tiedossa. /16/

5 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä ei päästy tavoitteeseen, sillä asiakas joka oli tilannut projektin Vaspecilta, perui tilauksen kokonaan ja koko käytännön osuus päätettiin siihen.

Opinnäytetyöstä saatiin asiakkaalle lohkokaavio, simulointeja, teoriaa erilaisista virranmittausmenetelmistä, sekä kaksi revisiota piirikaaviosta jotka olivat jännitemittauksen kytkentöjä lukuun ottamatta valmiina. Uupumaan jäivät testiohjel-misto, kalustettu prototyyppi, komponenttilista sekä laitteen fyysinen hahmotel-ma.

Jatkokehitystä ajatellen tulisi piirikaavioon lisätä jännitteenmittaukseen vaadittavat osat, mitoittaa komponentit, suorittaa tarvittavat mittaukset sekä kalustaa piiri-levy piirustusten mukaisesti.

LÄHTEET

- /1/ Yadong Liu, Xiaolei Xie, Yue Hu, Yong Qian, Gehao Sheng and Xiuchen Jiang, Kiina, 21.06.2016 A Novel Transient Fault Current Sensor Based on the PCB Rogowski Coil for Overhead Transmission Lines Viitattu 16.4.2018.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4883433/>
- /2/ What is a Rogowski Coil? Viitattu 29.6.2017. <http://www.pemuk.com/how-it-works.aspx>
- /3/ What is the difference between rogowski coils and conventional CT: s.
Viitattu 31.6.2017. <https://www.setra.com/blog/what-is-the-difference-between-rogerski-coils-and-conventional-cts>
- /4/ Sähköverkkojen rakenne. Viitattu 10.3.2018.
https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiaverkot/sahkoverkot/
- /5/ Sähkön siirto. Viitattu 10.3.2018.
http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/3sahkon_siirto_ja_jakeluverkot.pdf
- /6/ The Current Transformer. Viitattu 30.6.2017. <https://www.electronics-tutorials.ws/transformer/current-transformer.html>
- /7/ PT100 resistance thermometers. Viitattu 9.3.2018.
<https://www.picotech.com/library/application-note/pt100-platinum-resistance-thermometers>
- /8/ Vastuslämpötila-anturi. Viitattu 9.3.2018.
<https://fi.wikipedia.org/wiki/Vastusl%C3%A4mp%C3%B6tila-anturi>
- /9/ Hall effect. Viitattu 4.4.2018. <https://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/hall-effect.html>
- /10/ Understanding and applying the hall effect. Viitattu 4.4.2018.
<https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/understanding-and-applying-the-hall-effect/>
- /11/ Sähköverkon vikatilanteet. Viitattu 14.4.2018.
<http://www.leenakorpinen.fi/archive/sahkoverkko/vikatilanteet.pdf>
- /12/ Shunt Resistor. Viitattu 20.3.2018. <http://www.resistorguide.com/shunt-resistor/>

/13/ Shunt Resistors. Viitattu 21.3.2018

<https://meettechniek.info/instruments/shunt-resistors.html>

/15/ Sähköverkon automaatio ja suojaus. Viitattu 14.4.2018.

http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/5sahkoverkon_automatio_ja_suojaus.pdf

/16/ AC Current measurement with pic controller. Viitattu 15.4.2018.

<http://microcontrollerslab.com/alternating-current-measurement-using-pic-micocontroller/>

/17/ Hall sensor current measurement. Viitattu 15.4.2018.

<http://www.instructables.com/id/How-to-Measure-AC-Current-using-Hall-Effect-Sensor/>

/18/ Electrical Network Automation and Communication Systems

J Matila PDF Kurssimateriaali. Viitattu 15.4.2018.

https://portal.vamk.fi/pluginfile.php/131581/mod_resource/content/1/Kurssikirjat/Practical-Electrical-Network-Automation-and-Communication-Systems.pdf

/19/ Rogowski Coil

Viitattu 22.4.2018

http://www.tmatlantic.com/encyclopedia/index.php?ELEMENT_ID=16812

/20/ Revolution in measuring techniques enables superior protection performance. Viitattu 19.4.2018.

https://library.e.abb.com/public/c1256d32004634bac1256e19006fca21/EDITORIAL_2001_02_en_Revolution_in_Measuring_Techniques_Enables_Superior_Protection_Performance.pdf

/21/ The basic principle of Zero-flux. Viitattu 4.7.2017. http://www.pmsms.com/?page_id=12

/22/ Zero-Flux Current Transformer

Viitattu 20.4.2018 <https://www.tradeindia.com/fp1154611/Zero-Flux-Current-Transformer.html>

/23/ Hall-Effect Sensing Provides Current Measurement for the Smart

Grid. Viitattu 14.4.2018 <https://www.digikey.fi/en/articles/techzone/2015/oct/hall-effect-sensing-provides-current-measurement-for-the-smart-grid>

/24/ Rtd sensors. Viitattu 9.3.2018

https://en.wikipedia.org/wiki/Resistance_thermometer

/25/ RTD Specifications. Viitattu 9.3.2018.

https://www.omega.com/Temperature/pdf/RTDSpecs_Ref.pdf

/26/ Muuntaja. Viitattu 11.10.2017. <https://fi.wikipedia.org/wiki/Muuntaja>

/27/ Analog-to-Digital conversion. Viitattu 1.4.2018.

<https://learn.sparkfun.com/tutorials/analog-to-digital-conversion>

/28/ Substation automation solution with IEC61850. Viitattu 11.12.2017.

[http://www02.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/9276485464e7953cc125770300133d9a/\\$file/ABB+Substation+Automation+Solution.pdf](http://www02.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/9276485464e7953cc125770300133d9a/$file/ABB+Substation+Automation+Solution.pdf)

/29/ SCADA-System. Viitattu 23.4.2018. <https://www.electronicshub.org/scada-system/>

/30/ Sähkönsiirto Viitattu: 11.3.2018

http://elearn.ncp.fi/materiaali/kainulainens/energiaverkko/energian_siirto/sahkonsiirto.htm

/31/ Rogowski-coil. Viitattu: 23.4.2018. <http://www.hqmeter.com/rogowski-coil.html>

/32/ Scada systems for electric power industry. Viitattu 24.4.2018.

<https://www.youtube.com/watch?v=WQWJzgbdq1E>